

1-8-2019

OTH Target Tracking Based on Transverse Earth Coordinate System in Arctic Region

Yongkan Sun

1.Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;;

Pingping Zhang

2.Liaoning 92941 Group, Huludao 125001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

OTH Target Tracking Based on Transverse Earth Coordinate System in Arctic Region

Abstract

Abstract: Aiming at the problem of the deviation of the target information when taking the geographic north as the azimuth datum in the horizon target tracking in Arctic region (especially in the polar regions), *a virtual method to re-partition the surface of the earth is proposed which can transform the geographic pole region into a virtual equatorial region. On the basis of the above, the transverse latitude and longitude grid, the transverse earth coordinate system and the transverse geographic coordinate system are constructed, The transverse geographic north is proposed as the azimuth datum, the target range is represented with the transverse azimuth in Arctic region, and the target tracking model based on the transverse earth coordinate system is constructed.* The results of simulation analysis show that, the OTH (over the horizon) target tracking method based on the transverse earth coordinates can overcome the deviation of polar OTH target indication information brought by the meridian convergence in Arctic region.

Keywords

Arctic region, OTH target tracking, transverse latitude and longitude grid, transverse earth coordinate system, transverse geographic coordinate system

Recommended Citation

Sun Yongkan, Zhang Pingping. OTH Target Tracking Based on Transverse Earth Coordinate System in Arctic Region[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3502-3513.

基于横向地球坐标系的极区超视距目标跟踪

孙永侃¹, 张萍萍²

(1.海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018; 2.辽宁 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 针对极区(特别是近极点地区)超视距目标跟踪中, 地理北作为方位基准带来的目指信息偏差问题, 提出采用虚拟方式对地球表面进行重新划分, 使地理极点区域转变为虚拟赤道区域, 提出构建横向经纬网格、横向地球坐标系以及横向地理坐标系, 提出将横向地理北作为方位基准, 在极区用横向方位角表示目标方位, 并构建基于横向地球坐标系的极区超视距目标跟踪模型, 仿真结果表明, 基于横向地球坐标系的极区超视距目标跟踪方法能够克服经线收敛带来的极区超视距目指信息偏差。

关键词: 极区; 超视距目标跟踪; 横向经纬网格; 横向地球坐标系; 横向地理坐标系

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3502-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809035

OTH Target Tracking Based on Transverse Earth Coordinate System in Arctic Region

Sun Yongkan¹, Zhang Pingping²

(1.Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 2.Liaoning 92941 Group, Huludao 125001, China)

Abstract: Aiming at the problem of the deviation of the target information when taking the geographic north as the azimuth datum in the horizon target tracking in Arctic region (especially in the polar regions), a virtual method to re-partition the surface of the earth is proposed which can transform the geographic pole region into a virtual equatorial region. On the basis of the above, the transverse latitude and longitude grid, the transverse earth coordinate system and the transverse geographic coordinate system are constructed, The transverse geographic north is proposed as the azimuth datum, the target range is represented with the transverse azimuth in Arctic region, and the target tracking model based on the transverse earth coordinate system is constructed. The results of simulation analysis show that, the OTH (over the horizon) target tracking method based on the transverse earth coordinates can overcome the deviation of polar OTH target indication information brought by the meridian convergence in Arctic region.

Keywords: Arctic region; OTH target tracking; transverse latitude and longitude grid; transverse earth coordinate system; transverse geographic coordinate system

引言

超视距目标跟踪是战场态势感知与作战资源



收稿日期: 2016-11-25 修回日期: 2017-06-28;

基金项目: 国防科研基金(DJYKY2014-077);

作者简介: 孙永侃(1965-), 男, 浙江义乌, 博士, 研究员, 博导, 研究方向为作战系统仿真。

管理的重要依据, 对提高作战效能和生存能力具有重要意义^[1]。与其他海域相比, 北冰洋海域覆盖的大面积浮冰限制了水面舰艇的活动范围, 这使得仅靠水面舰艇自身难于完成极区全区域的超视距目标搜索与跟踪, 需要来自包括岸基雷达、友邻舰、舰载直升机、预警机等非本舰的第三方超视距引导信息来协助对目标位置进行精确定位与跟踪, 才能

<http://www.china-simulation.com>

• 3502 •

保证水面舰艇极区全区域的战场感知能力。

传统超视距目标跟踪中, 将目标位置信息转换到以融合中心为原点的平面直角坐标系中进行跟踪^[2-8], 由于超视距目标的距离是目标与舰艇的大地弧线长, 位置信息在传递过程中需要在多个节点、多个坐标系中转换, 导致目标位置信息精度不高。因此若仍然通过以融合中心为原点的直角坐标系来标定目标的位置将不再适合。

相关文献针对超视距跟踪中的传统位置表示方法带来的目指信息偏差也进行了研究。文献[9]为了避免加入独立的坐标配准算法, 推导了天波超视距雷达坐标系与地理坐标系之间的非线性坐标变换关系, 以直接得到目标在地理坐标系下的状态估计。文献[10-11]针对地球曲率对超视距目标指示的影响问题, 建立了基于大地坐标的目标运动方程和观测方程, 并将无迹卡尔曼滤波(UKF 滤波)方法运用于目标的跟踪。文献[12-13]采用大地坐标系为统一坐标系进行时间对准、航迹滤波以及航迹融合。这些研究对提高超视距目指信息精度提出了各自的方法, 但都没有考虑超视距目标跟踪在极区受特殊地理环境的影响, 因此必须寻求合适的解决方法克服传统超视距目标跟踪方法在极区的使用缺陷, 提高极区超视距目标跟踪精度。

针对在极区(特别是近极点地区)超视距目标跟踪中, 以地理北作为方位基准时, 由于经线收敛引起地理北收敛于极点, 进而使目标方位角迅速收敛带来的极区超视距目指信息偏差问题, 本文提出建立虚拟极点、虚拟赤道, 使虚拟北不再收敛于北极点, 将虚拟北作为方位基准, 用虚拟方位角(即目标方位线与虚拟北的夹角)来表示目标方位, 位置坐标采用虚拟地球坐标来表示, 即在虚拟经纬网格、虚拟地球坐标系以及虚拟地理坐标系中进行极区超视距目标跟踪, 从而提高极区超视距目标跟踪精度。

1 构建横向经纬网格与横向坐标系

1.1 横向经纬网格的建立

传统地理位置的表示采用经纬度方式^[14], 传

统的经纬度位置表示方式中, 由于地球的椭球形状特点, 经线和纬线在赤道附近几乎呈正交关系, 一旦移向任一地理极点, 经线开始向一点汇合, 那么纬线和经线的正交关系就不再成立, 北极地区地处地球的最北端, 经线迅速收敛, 在北极点, 所有经线交叉汇聚, 纬线缩为一点。越接近北极点, 经线收敛越迅速, 航向相对极点变化剧烈。

按照地球特有的自转轴而将地球球面划分为经纬度进行位置表示的方法是我们所熟知的。但从数学意义上讲, 将地球球面按照经纬度进行位置表示的方法, 可以是任意划分的, 任何绕地球的大圆都可以被选择作为“赤道”, 从而通过与赤道平面正交并且通过球心的平面能确定相应的“极点”。

为了克服经线收敛带来的超视距目指信息偏差, 本文提出改变传统经纬网格的定义, 提出将地球球面以另外一种方式进行划分, 建立一种虚拟的经纬网格系统, 将地球极区转变为虚拟赤道地区。依据这一假设, 本文提出在虚拟的经纬网格中, 将虚拟极点定义为地理赤道上某点, 将虚拟赤道定义为穿过地理极点的大圆, 然后依据虚拟赤道和虚拟极点设置虚拟纬线和虚拟经线, 虚拟经线为收敛于虚拟极点的大圆, 虚拟纬线平行于虚拟赤道面, 本文将虚拟的经纬网格称为横向经纬网格, 横向经纬网格中的经度称为横向经度, 横向经纬网格中的纬度称为横向纬度, 采用横向经纬度对地理位置进行表示, 如图 1 所示。

依据上述思路, 在以横向经纬网格对地球球面上的某点进行位置表示时, 为了使传统经纬网格与横向经纬网格之间的转换关系尽量简便, 在横向经纬网格中, 定义横向极点位于 $90^{\circ}\text{E}/90^{\circ}\text{W}$ 子午线与赤道的交点处, 其中横向北极点位于东经 90° , 纬度为 0° 的赤道处, 横向往南极点位于西经 90° , 纬度为 0° 的赤道处, 定义横向赤道位于 0° 经线和 180° 经线上, 定义横向本初子午线为经过北极点的 $90^{\circ}\text{E}/90^{\circ}\text{W}$ 子午线。在此基础上可以根据横向北极点确定横向极轴、横向赤道平面、横向本初子午面以及横向经纬网格, 如图 2 所示。

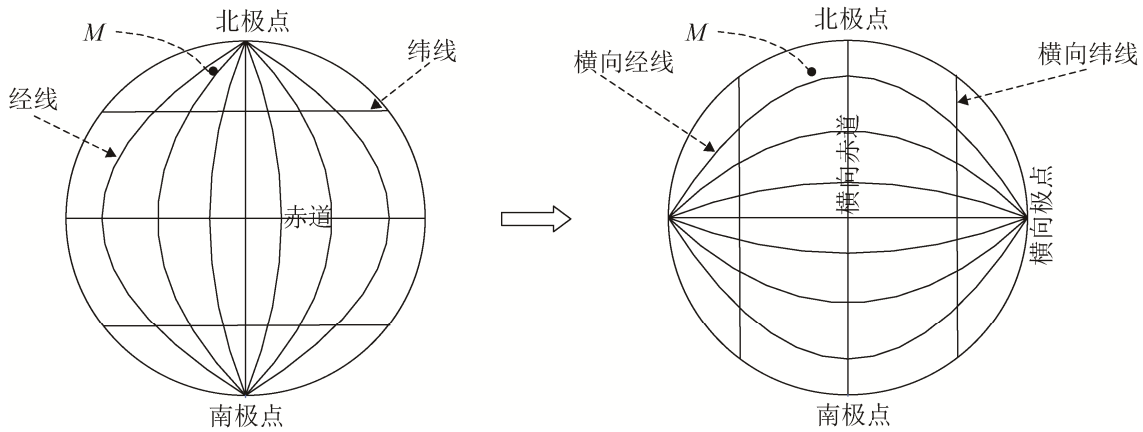


图1 地球表面从传统经纬网格表示到横向经纬网格表示的变换

Fig. 1 Transformation from the traditional longitude and latitude grid to transverse latitude and longitude grid on surface of the earth

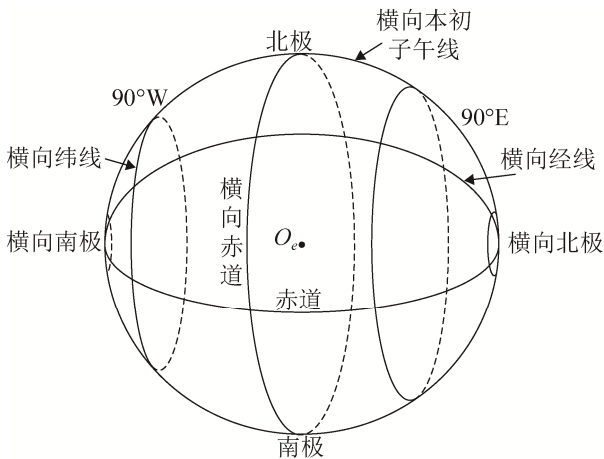


图2 横向经纬网格

Fig. 2 Transverse latitude and longitude grid

为了得到传统经纬度与横向经纬度之间的变换关系, 本文提出在横向经纬网格的基础上建立横向地球坐标系。

1.2 横向地球坐标系的建立

下面对坐标系定义如下:

e 系: 地球坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$;

T_e 系: 横向地球坐标系 $O_e X_{Te} Y_{Te} Z_{Te}$;

t 系: 地理坐标系 $O_t X_t Y_t Z_t$;

Tt 系: 横向地理坐标系 $O_t X_{Tt} Y_{Tt} Z_{Tt}$;

φ : 纬度(地球坐标系下的纬度);

λ : 经度(地球坐标系下的经度);

φ_T : 横向纬度(横向地球坐标系下的纬度);

λ_T : 横向经度(横向地球坐标系下的经度);

R : 地球半径(假设地球为球体);

地球坐标系如图3所示, 其中 M 点是地球球面上任意位置。

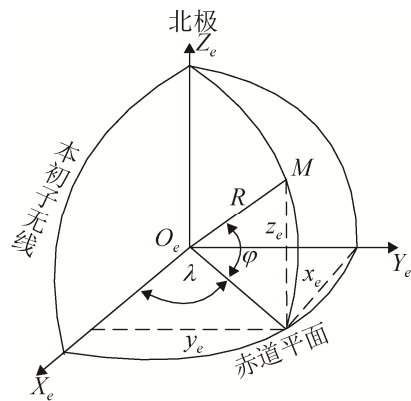
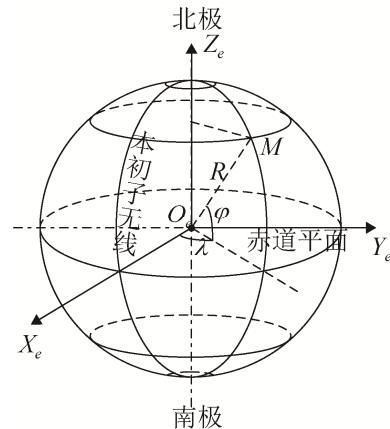


图3 地球坐标系

Fig. 3 Earth coordinate system

按照本文对横向经纬网格的定义可知, 将地球坐标系旋转两次即可得到横向地球坐标系, 即将 X_e 轴旋转至 Z_e 轴, Z_e 轴旋转至 Y_e 轴, Y_e 轴旋转至 X_e 轴, 可见旋转后得到的横向地球坐标系的 X_{Te} 轴与原 Z_e 轴重合, Y_{Te} 轴与原 X_e 轴重合, Z_{Te} 轴与原 X_e 轴重合。在旋转得到的横向地球坐标系中, 原点仍定义为地球坐标系中的原点地球质心 O_e , 横向赤道面为 $O_e X_{Te} Y_{Te}$, 横向本初子午面 $O_e X_{Te} Z_{Te}$ 。横向地球坐标系如图 4 所示, 在横向地球坐标系中, 球面任意一点 M 点的位置用横向经纬度坐标来描述, 即横向经度 λ_T 和横向纬度 φ_T , 其中: 横向经度 λ_T 为横向本初子午面与通过 M 点的横向子午面之间的夹角, 横向纬度 φ_T 为 M 点和地球质心连线与横向赤道面之间的夹角。

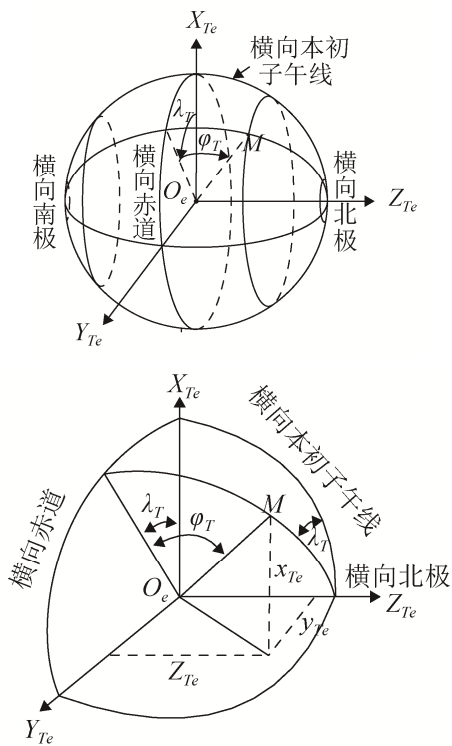


图 4 横向地球坐标系

Fig. 4 Transverse Earth coordinate system

1.3 横向地理坐标系的建立

为了建立方位基准, 下面依据横向地球坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ 建立相应的横向地理坐标系 $O_t X_{Ti} Y_{Ti} Z_{Ti}$, 横向地理坐标系的原点与地理坐标系中的原点为

同一点, 仍定义为地理坐标系中的载体质心 O_t , 横向地理坐标系的北不再是指向地理坐标系中地理北的方向, 而是定义为沿当地横向经线指向横向北极点的方向, Y_{Ti} 轴指向横向北, Z_{Ti} 轴沿地理垂线指向上, X_{Ti} 轴的方向与 Y_{Ti} 轴呈右手定则关系, 即在当地水平面内沿当地横向纬线的切线方向指向横向东, 这样就建立了横向地理坐标系, 即横向东-北-天坐标系。由图 5 可见横向地理坐标系与地理坐标系的关系。

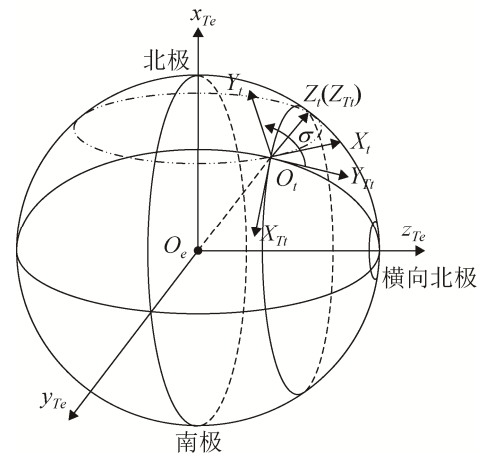


图 5 地理坐标系与横向地理坐标系的关系

Fig. 5 Relationship between geographic coordinate system and transverse geographic coordinate system

2 构建基于横向地球坐标系的大地主题解算模型

超视距目标指示不是通常意义的视距内或平面上的距离方位, 而是需要特殊转换的、地球表面的大圆弧长和方位角, 通常采用大地主题解算模型进行转换^[15-16]。因此为了实现大地极坐标转换到横向地球坐标系的变换, 本文建立了基于横向地球坐标系的大地主题解算公式, 对横向地球大地主题解算的正解与反解公式进行了求解, 从而将传感器测量的目标的大圆弧长距离以及方位角转化为目标的横向经纬度。因此, 在极区, 目标方位采用横向方位角来表示, 目标位置坐标采用横向地球坐标来表示, 对应的大地主题解算称为横向地球大地主题解算。

对于将地球近似成圆球体, 横向地球大地主题解算问题就变成了求解球面上横极球面三角形(即地球横向北极点与两个大地点组成的三角形)的问题。

如图6所示。在圆球面上有两点 $P_1(\lambda_{T1}, \varphi_{T1})$ 、 $P_2(\lambda_{T2}, \varphi_{T2})$, P_1 与 P_2 之间的大圆弧长为 S_{12} , 两点间的横向方位角 A'_{21} 、 A'_{12} , $\Delta\lambda_T$ 为 P_1 、 P_2 之间的横向经差, P 点为横向极点, P 、 P_1 和 P_2 三点组成了横极球面三角形。那么横极球面三角形的计算公式为:

$$\sin S_{12} \sin A'_{12} = \sin \Delta\lambda_T \cos \varphi_{T2} \quad (1)$$

$$\sin S_{12} \sin A'_{21} = -\sin \Delta\lambda_T \cos \varphi_{T1} \quad (2)$$

$$\sin S_{12} \cos A'_{12} = \cos \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} - \sin \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T \quad (3)$$

$$\sin S_{12} \cos A'_{21} = \sin \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2} - \cos \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T \quad (4)$$

$$\cos S_{12} = \sin \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} + \cos \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T \quad (5)$$

$$\cos \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T = \cos \varphi_{T1} \cos S_{12} - \sin \varphi_{T1} \sin S_{12} \cos A'_{12} \quad (6)$$

$$\cos \varphi_{T2} \cos A'_{21} = \sin \varphi_{T1} \sin S_{12} - \cos \varphi_{T1} \cos S_{12} \cos A'_{12} \quad (7)$$

$$\cos \varphi_{T2} \sin A'_{21} = -\cos \varphi_{T1} \sin A'_{12} \quad (8)$$

$$\sin \varphi_{T2} = \sin \varphi_{T1} \cos S_{12} + \cos \varphi_{T1} \sin S_{12} \cos A'_{12} \quad (9)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{T2} - \lambda_{T1} \quad (10)$$

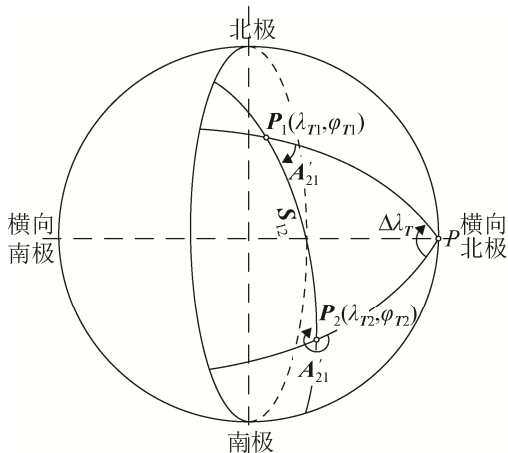


图6 横向地球大地主题解算示意图

Fig. 6 Diagram of transverse geodetic problem solving

2.1 构建横向地球大地主题解算正解模型

已知: λ_{T1} 、 φ_{T1} 、 S_{12} 和 A'_{12} , 求: λ_{T2} 、 φ_{T2} 和 A'_{21} 。解算用的公式系如下:

首先按式(9)求出 $\sin \varphi_{T2}$, 再用下式求取 φ_{T2} :

$$\tan \varphi_{T2} = \frac{\sin \varphi_{T2}}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_{T2}}} \quad (11)$$

在求取 λ_{T2} 时, 可先求出横向经差 $\Delta\lambda_T$, 取式(1)除以式(6)就可以得到:

$$\tan \Delta\lambda_T = \frac{\sin S_{12} \sin A'_{12}}{\cos \varphi_{T1} \cos S_{12} - \sin \varphi_{T1} \sin S_{12} \cos A'_{12}} \quad (12)$$

为求取方位角 A'_{21} , 取式(8)除以式(7), 得到:

$$\tan A'_{21} = \frac{\cos \varphi_{T1} \sin A'_{12}}{\cos \varphi_{T1} \cos S_{12} \cos A'_{12} - \sin \varphi_{T1} \sin S_{12}} \quad (13)$$

2.2 构建横向地球大地主题解算反解模型

已知: λ_{T1} 、 φ_{T1} 和 λ_{T2} 、 φ_{T2} , 求: S_{12} 、 A'_{12} 和 A'_{21} , 解算用的公式系如下:

首先求出 A'_{12} , 用式(1)除以式(3)可以得到:

$$\tan A'_{12} = \frac{\sin \Delta\lambda_T \cos \varphi_{T2}}{\cos \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} - \sin \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T} \quad (14)$$

求取 A'_{21} , 可取式(2)除以式(4)就可以得到:

$$\tan A'_{21} = \frac{\sin \Delta\lambda_T \cos \varphi_{T1}}{\cos \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T - \sin \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2}} \quad (15)$$

为求取 S_{12} , 先将式(1)乘以 $\sin A'_{12}$ 加上式(3)乘以 $\cos A'_{12}$, 再将结果除以式(5)得到:

$$\tan S_{12} = \frac{p \sin A'_{12} + q \cos A'_{12}}{\sin \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} + \cos \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T} \quad (16)$$

式中: $p = \sin \Delta\lambda_T \cos \varphi_{T2}$

$$q = \cos \varphi_{T1} \sin \varphi_{T2} - \sin \varphi_{T1} \cos \varphi_{T2} \cos \Delta\lambda_T$$

3 构建基于横向地球坐标系的目标运动模型与目标观测模型

3.1 构建基于横向地球坐标系的极区超视距目标运动模型

在超视距目标跟踪中, 由于地球曲率的影响,

基于直角坐标建立目标的状态方程和观测方程不再合适。针对这一问题, 将传感器测量的目标的大地弧长距离以及方位角转化为目标的横向经纬度表示后, 本文提出进一步依据横向地球坐标系建立目标的运动方程和观测方程。

较大型海上运动目标(舰艇、大型船只)的运动通常在一个平面上运动, 由于其自身惯性, 加速度的变化是缓慢的, 可以把匀速运动看作是其运动的常态。目标在水中运动时如果受风浪、海流等影响而使速度有相对轻微变化, 在运动模型中, 可将这种变化作为随机噪声输入^[17]。可见对于舰艇类大质量动目标的机动跟踪的基础是对匀速直线运动方式和匀速慢转弯运动机动方式的跟踪, 因此本文使用 CT 模型来描述目标运动。

假设采样时间间隔为 T , 令 k 时刻横向地球坐标系下的目标状态向量为 $X_k = [\lambda_T, \varphi_T, v, \psi_T, \omega]^T$, 其中, λ_T, φ_T 为 k 时刻目标的横向经度和横向纬度, v 为 k 时刻目标运动速度, ψ_T 为 k 时刻目标运动的横向航向角, ω 为 k 时刻目标运动角速度。

则横向地球坐标系下的目标运动方程如下:

$$X(k+1) = f(X(k), k) + W(k) \quad (17)$$

式中: $W(k)$ 为均值为 0、协方差为 $Q(k)$ 的高斯噪声序列;

$$f(X(k), k) \text{ 为} \begin{cases} \lambda_T[k+1] = \lambda_T[k] + \frac{2v[k] \sin \frac{T\omega[k]}{2} \cos \left(\psi_T[k] + \frac{T\omega[k]}{2} \right)}{k \cos \varphi_T[k] \omega[k]} \\ \varphi_T[k+1] = \varphi_T[k] + \frac{2v[k] \sin \frac{T\omega[k]}{2} \sin \left(\psi_T[k] + \frac{T\omega[k]}{2} \right)}{k\omega[k]} \\ v[k+1] = v[k] \\ \psi_T[k+1] = \psi_T[k] + \omega[k]T \\ \omega[k+1] = \omega[k] \end{cases} \quad (18)$$

式中 r 为地球半径。

3.2 构建基于横向地球坐标系的极区超视距目标观测模型

3.2.1 本舰舰载超视距雷达进行目标观测情况下的目标观测模型建立

目前, 新一代的舰载雷达逐步具备了超视距探测的能力^[18]。由于探测距离较远, 就必须考虑地球曲率的影响, 因此舰载超视距雷达对目标的探测距离不再是传统的直线距离, 而是目标与雷达之间的大地弧线距离。也就是说, 雷达 k 时刻的目标观测向量为:

$$Z[k] = [A'[k], S[k]]^T \quad (19)$$

观测方程为:

$$Z[k] = H(k, X(k)) + v[k] \quad (20)$$

式中: $h(k)$ 为均值为 0、协方差为 $R(k)$ 的高斯噪声序列。

设本舰位置用横向经纬度 $\lambda_{Tr}, \omega_{Tr}$ 表示, 则根据大地主题解算反解公式可得出 $h(X(k), k)$ 为

$$A' = \arctan \frac{\sin(\Delta\lambda_T) \cos \varphi_T}{\cos \varphi_{Tr} \sin \varphi_T - \sin \varphi_{Tr} \cos \varphi_T \cos(\Delta\lambda_T)} \quad (21)$$

$$S = \arctan \frac{P \sin A'_r + q \cos A'_r}{\sin \varphi_{Tr} \sin \varphi_T + \cos \varphi_{Tr} \cos \varphi_T \cos(\Delta\lambda_T)} \quad (22)$$

式中: A'_m 为目标方位, S_{rm} 为目标距离。

$$P = \sin(\Delta\lambda_T) \cos \varphi_T \quad (23)$$

$$q = \cos \varphi_{Tr} \sin \varphi_T - \sin \varphi_{Tr} \cos \varphi_T \cos(\Delta\lambda_T) \quad (24)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_T - \lambda_{Tr} \quad (25)$$

3.2.2 第三方引导信息进行目标观测情况下的目标观测模型建立

通过数据链进行第三方引导信息的远程目标指示与跟踪。数据链目标指示的内容有两种情况^[19-21]:

(1) 第三方仅提供包括经度和纬度的目标位置信息, 但不提供目标运动参数。

(2) 第三方既提供包括经度和纬度的目标位置信息, 也提供包括航向和航速的目标运动信息。

下面对这两种情况分别进行研究。

(1) 第三方仅提供目标位置参数情况下的目标观测模型构建

由于第三方仅能提供目标位置参数经度纬度, 因此观测向量为:

$$Z[k] = [\lambda, \varphi]^T \quad (26)$$

观测方程为:

$$Z[k] = h(k, X(k)) + V[k] \quad (27)$$

式中: $h(k)$ 为均值为 0、协方差为 $R(k)$ 的高斯噪声序列;

则观测向量 $Z[k]$ 与状态向量 $X(k)$ 的函数关系 $h(X(k), k)$ 可以通过横向经纬度与经纬度之间的变换得到如下

$$h(X(k), k) = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{\sin \varphi_T}{\cos \varphi_T \sin \lambda_T}\right) \\ \arcsin(\cos \varphi_T \cos \lambda_T) \end{bmatrix} \quad (28)$$

(2) 第三方提供目标位置及运动参数情况下的目标观测模型构建

由于第三方可提供目标的经纬度、速度以及航向信息, 则观测向量可设置为:

$$Z[k] = [\lambda, \varphi, v, \psi]^T \quad (29)$$

则观测向量 $Z[k]$ 与与状态向量 $X(k)$ 的函数关系 $h(X(k), k)$ 可以通过横向经纬度与经纬度之间的变换得出如下

$$h(X(k), k) = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{\sin \varphi_T}{\cos \varphi_T \sin \lambda_T}\right) \\ \arcsin(\cos \varphi_T \cos \lambda_T) \\ v \\ \psi_T + \arctan\left(\frac{\sin \lambda_T}{\sin \varphi_T \cos \lambda_T}\right) \end{bmatrix} \quad (30)$$

4 构建基于横向地球坐标系的无迹卡尔曼滤波(UKF)模型

由前面建立的模型可见, 与传统直角坐标系下的滤波不同, 横向地球坐标系下, 目标的运动方程以及观测方程都是复杂的非线性方程, 从而使目标跟踪变为非线性估计问题, 传统的用于非线性系统的扩展卡尔曼滤波不适用于本文建立的非线性模

型的滤波。由于无迹卡尔曼滤波中的 UT 变换比求导雅可比矩阵能更好地描述非线性特性, 比扩展卡尔曼滤波有更高的估值精度^[22-26], 因此本文超视距目标跟踪中的滤波算法采用无迹卡尔曼滤波方法。

4.1 UT 变换模型

设 n 维随机变量 $x \sim N(\bar{x}, P_x)$, 随机变量 y 为 x 的某一非线性函数 $y = f(x)$, x 的统计特性为 (\bar{x}, P_x) , 在确保采样均值和协方差为 \bar{x} 和 P_x 的前提下, 选择一组 $2n+1$ 个见权点集 $\{\chi_i\}$ 来近似这个随机变量的分布。

$$\chi_0 = \bar{x} \quad (31)$$

$$W_0^m = \frac{\rho}{n + \rho} \quad (32)$$

$$\chi_i = \bar{x} + (\sqrt{(n + \rho)P_x})_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (33)$$

$$W_i^m = W_i^c = \frac{1}{2(n + \rho)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (34)$$

$$W_0^c = W_0^m + (1 + \beta - \alpha^2) \quad (35)$$

$$\chi_{n+i} = \bar{x} - (\sqrt{(n + \rho)P_x})_i, \quad i = n + 1, \dots, 2n \quad (36)$$

对 Sigma 点集进行非线性变换, 则得到变换后的点集 $\{y_i\}$ 。

$$y_i = f(\chi_i), \quad i = 1, \dots, 2n + 1 \quad (37)$$

然后对方差和均值进行加权处理, 并应用于采样的每个近似高斯分布离散点(Sigma 点), 则得到 y 的统计特性 (\bar{y}, P_y)

$$\bar{y} = \sum_{i=0}^{L-1} W_i^m y_i \quad (38)$$

$$P_y = \sum_{i=0}^{L-1} W_i^c (y_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})^T \quad (39)$$

4.2 基于 UKF 算法的航迹预测模型

步骤 1, 选定滤波初值:

$$\hat{X}_0 = EX_0 \quad (40)$$

$$P_0 = E[(X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T] \quad (41)$$

对 $k = 1, 2, 3 \dots$ 执行:

步骤 2, 计算 $k-1$ 时刻的 $2n+1$ 个 Sigma 样本点

$$\tilde{\chi}_{k-1}^{(0)} = \hat{X}_{k-1} \quad (42)$$

$$\tilde{\chi}_{k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k-1} + \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{(i)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (43)$$

$$\tilde{\chi}_{k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k-1} - \gamma(\sqrt{P_{k-1}})_{(i-n)}, \quad i = n+1, n+2, \dots, 2n \quad (44)$$

式中, $\gamma = \sqrt{n+\rho}$

步骤3, 计算 k 时刻的一步预测模型值

$$\chi_{k/k-1}^{*(i)} = f[\tilde{\chi}_{k-1}^{(i)}, u_{k-1}], \quad i = 0, 1, \dots, 2n \quad (45)$$

$$\hat{X}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \chi_{k/k-1}^{*(i)} \quad (46)$$

$$P_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\chi_{k/k-1}^{*(i)} - \hat{X}_{k/k-1}] [\chi_{k/k-1}^{*(i)} - \hat{X}_{k/k-1}]^T + Q_{k-1} \quad (47)$$

步骤4, 计算 k 时刻的一步预测样本点

$$\chi_{k/k-1}^{(0)} = \hat{X}_{k/k-1} \quad (48)$$

$$\chi_{k/k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k/k-1} + \gamma(\sqrt{P_{k/k-1}})_{(i)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (49)$$

$$\chi_{k/k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k/k-1} - \gamma(\sqrt{P_{k/k-1}})_{(i-n)}, \quad i = n+1, n+2, \dots, 2n \quad (50)$$

步骤5, 计算 $P_{(XZ)_{k/k-1}}$, $P_{(ZZ)_{k/k-1}}$

$$P_{(XZ)_{k/k-1}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\chi_{k/k-1}^{(i)} - \hat{X}_{k/k-1}] [Z_{k/k-1}^{(i)} - \hat{Z}_{k/k-1}]^T \quad (51)$$

$$P_{(ZZ)_{k/k-1}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [Z_{k/k-1}^{(i)} - \hat{Z}_{k/k-1}] [Z_{k/k-1}^{(i)} - \hat{Z}_{k/k-1}]^T + R_k \quad (52)$$

式中: $Z_{k/k-1}^{(i)} = h[\chi_{k/k-1}^{(i)}]$, $i = 0, 1, \dots, 2n$, $\hat{Z}_{k/k-1} =$

$$\sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Z_{k/k-1}^{(i)}$$

步骤6, 计算增益矩阵

$$K_k = P_{(XZ)_{k/k-1}} P_{(ZZ)_{k/k-1}}^{-1} \quad (53)$$

步骤7, 计算滤波值

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k [Z_k - \hat{Z}_{k/k-1}] \quad (54)$$

$$P_k = P_{k/k-1} - K_k P_{(ZZ)_{k/k-1}} K_k^T \quad (55)$$

5 仿真与分析

下面对本文建立的极区超视距目标跟踪模型进行仿真。仿真条件设置如下:

假设目标初始经纬度为(100°, 78°), 即初始横向经纬度为(-2.1138°, 11.815°), 初始横向航向为36.869°。如表1所示, 目标首先作匀速直线运动, 然后直线加速又直线减速, 紧接着, 目标以恒定速率作蛇形机动, 然后, 目标再作直线加速, 最后以

一恒定速率匀速直线运动。

表1 目标运动轨迹

Tab. 1 Target trajectory

阶段	动作	持续时间/s	速度/(m/s)	加速度
1	匀速直航	0~350	10	0 m/s ²
2	加速直航	350~450	10~20	0.1 m/s ²
3	减速直航	450~600	20~5	-0.1 m/s ²
4	蛇形机动	600~900	5	0.3°/s ²
5	蛇形机动	900~1 200	5	-0.3°/s ²
6	加速直航	1 200~1 300	5~15	0.1 m/s ²
7	匀速直航	1 300~1 800	15	0 m/s ²

假设仿真实验目标运动的初始状态值为 $X(0) = [-2.1138^\circ, 11.815^\circ, 10, 36.87^\circ, 0]^T$ 、 $P(0) = \text{diag}(10^{-6}, 10^{-6}, 100, 100, 1)$, 系统噪声阵为 $Q(k) = \text{diag}(10^{-8}, 10^{-8}, 1, 1, 0.01)$ 。目标运动轨迹如图7所示, 目标速度变化曲线如图8所示。

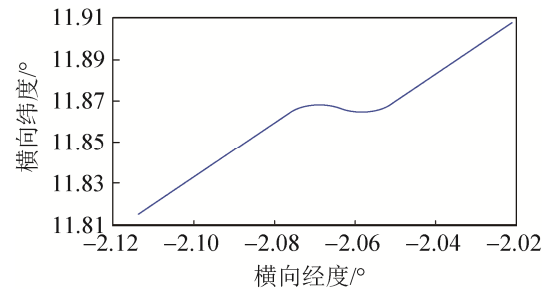


图7 目标运动轨迹

Fig. 7 Target trajectory

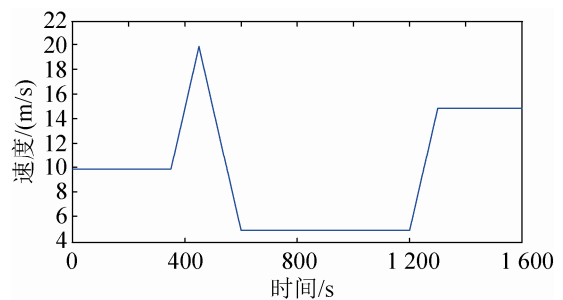


图8 目标速度变化曲线图

Fig. 8 Diagram of target speed change

UKF 参数设置为: ($\alpha = 0.01, \beta = 2, k = 0$) 滤波采样间隔 $T = 10$ s。分别对采用本舰舰载超视距雷达进行目标观测及采用第三方引导信息进行目标观测两种情况进行仿真实验。

(1) 采用本舰舰载超视距雷达进行目标观测

的目标跟踪仿真为了仿真方便假设本舰不动,本舰超视距雷达所在位置经纬度为 $(90^\circ, 80.3^\circ)$,即横向经纬度为 $(-1.5317^\circ, 9.5794^\circ)$ 。雷达探测的方位误差为 0.1° ,距离误差为 0.1 km 。观测噪声为 $R(k) = \text{diag}(0.01, 0.01)$,采用UKF算法进行滤波,将得到的位置估计与目标的真实运动轨迹的比较结果如图9所示;并进行50次蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真得到各测量时刻的位置均方根误差,如图10所示。

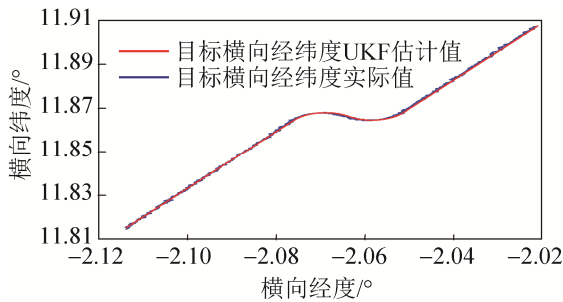


图9 目标跟踪位置与真实位置比较曲线

Fig. 9 Comparison curve between tracking position and true position of target

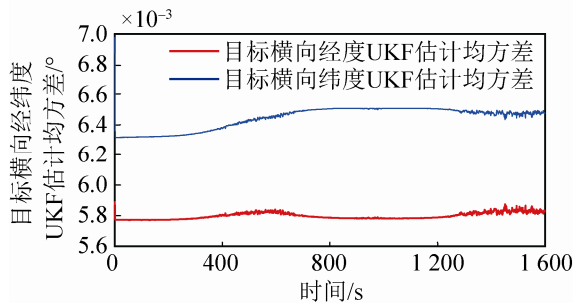


图10 跟踪位置均方根误差曲线

Fig. 10 Root mean square error curve of tracking position

(2) 第3方通过数据链进行远程目标指示的目标跟踪情况首先对第3方仅提供目标位置(经纬度)的情况进行仿真如下:

假设位置误差为1海里,观测噪声为 $R(k) = \text{diag}((1852 / (r \times \cos(\varphi)))^2, (1852 / r)^2)$,采用UKF算法进行滤波,将得到的位置估计与目标的真实运动轨迹的比较结果如图11所示;并进行50次蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真得到各测量时刻的位置均方根误差,如图12所示。

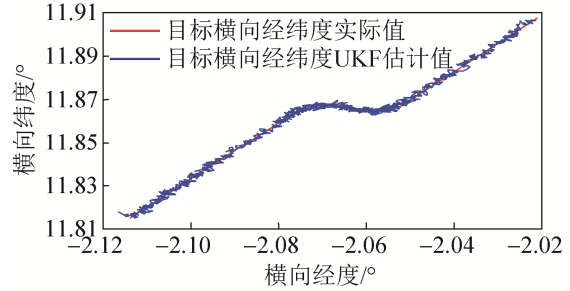


图11 目标跟踪位置与真实位置比较曲线

Fig. 11 Comparison curve between tracking position and true position of target

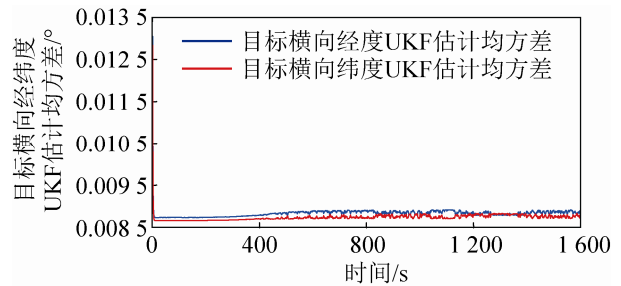


图12 跟踪位置均方根误差曲线

Fig. 12 Root mean square error curve of tracking position

然后对第3方可提供目标位置(经纬度)、速度、航向的情况进行仿真如下:

假设位置误差为1海里,速度误差0.1节,航向误差 0.1° 。则观测噪声为 $R(k) = \text{diag}((1852 / (r \times \cos(\varphi)))^2, (1852 / r)^2, 0.01, (0.5 * \pi / 180)^2)$,采用UKF算法进行滤波,将得到的位置估计与目标的真实运动轨迹的比较结果如图13所示;并进行50次蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真得到各测量时刻的位置均方根误差,如图14所示。

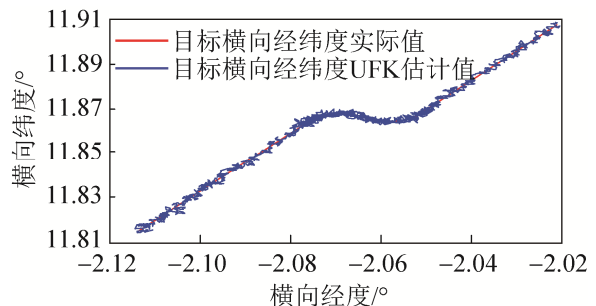


图13 目标跟踪位置与真实位置比较曲线

Fig. 13 Comparison curve between tracking position and true position of target

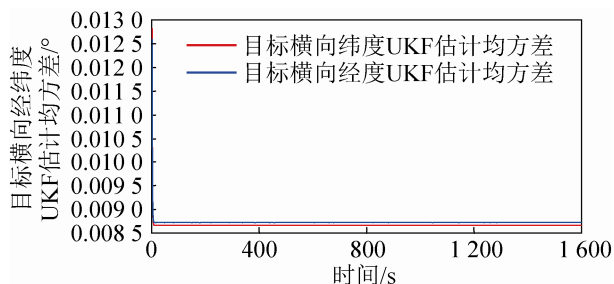


图 14 跟踪位置均方根误差曲线

Fig. 14 Root mean square error curve of tracking position

从图 9~14 可以看出, 横向地球坐标系下的目标跟踪的效果是非常好的。初始状态下, 滤波曲线能很快收敛到真实航迹附近, 跟踪曲线也比较平稳。由图 11~14 可以看出, 当第三方引导时, 增加目标速度和航向观测信息时, 比仅提供位置进行观测的跟踪效果好。仿真分析的结果表明: 基于横向地球坐标系的极区超视距引导中的目标跟踪模型, 避免了坐标系间的多次转换, 提高了目指信息的精度。

6 坐标系切换流程设计

当超视距目标跟踪在极区和中低纬度地区采用不同的坐标基准时, 需要在常规坐标基准与极区横向坐标基准之间进行切换。理论上对于 $45^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 及 $45^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 的区域即可采用横向坐标系进行超视距目标跟踪, 需要说明的是虽然通常将纬度超过 75° 的区域作为极区, 但从实际应用角度讲, 坐标基准的纬度边界值的确定取决于超视距目标跟踪误差需求, 切换时机选择将影响跟踪精度。本文提出一个包括两个同心圆重叠区域的切换流程。如图 15 所示, 当超视距目标进入两同心圆的内部(即纬度高于 φ_H)时, 启动极区横向坐标系跟踪模式。当且仅当超视距目标离开两同心圆的外环(即纬度低于 φ_L)时, 启动常规坐标系跟踪模式。

具体的坐标系切换流程设计如下:

- (1) 判断目标是否位于地球坐标系的极区, 极区区域的划分是当纬度高于预先设定的一个纬度边界值;
- (2) 如果目标不是位于地球坐标系的极区, 则

利用地球坐标系采用常规坐标系进行超视距目标的跟踪。

- (3) 如果目标位于地球坐标系的极区:

- a. 旋转地球坐标系形成横向地球坐标系, 此时地球坐标系与横向地球坐标系的转换关系是已知的;
- b. 将目标位置、速度等参数变换到横向地球坐标系中, 用目标在横向地球坐标系中的新的参数进行跟踪;
- c. 将步骤 b 得到的新的目标参数转换到地球坐标系中;

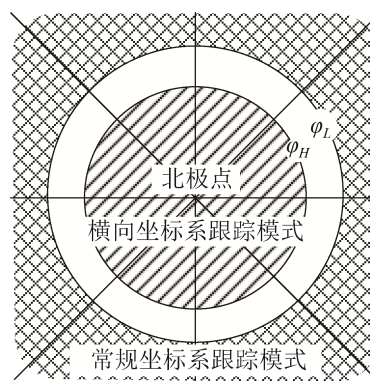


图 15 坐标系切换模式

Fig. 15 Switching mode of coordinate system

7 结论

为了克服经线收敛引起地理北收敛于极点带来的极区超视距目指信息偏差问题, 本文采用虚拟方式对地球表面进行重新划分, 通过构建虚拟极点、虚拟赤道, 使地理极点区域转变为虚拟赤道区域, 在此基础上构建横向经纬网格、横向地球坐标系以及横向地理坐标系, 并构建基于横向地球坐标系的极区超视距目标跟踪模型, 仿真分析的结果表明, 基于横向地球坐标系的极区超视距目标跟踪方法能够克服经线收敛带来的极区超视距目指信息偏差, 能够提高极区超视距目标跟踪精度。此外, 横向坐标系还适用于极区海图制作、载体惯性导航以及超视距引导等方面的应用, 与基于横向地球坐标系的超视距目标跟踪配合使用能够实现更高的超视距目标跟踪精度。

参考文献

- [1] 王钢, 贾世楼, 张琦. 超视距目标指示的方法与性能研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(6): 110-113.
Wang Gang, Jia Shilou, Zhang Qi. Study on the Methods and Performance of OTH[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006, 11(6): 110-113.
- [2] 朱士龙, 张佳忠, 顾浩. 超视距目标信息仿真测试技术研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1701-1704.
Zhu Shilong, Zhang Jiazhong, Gu Hao. Research on Beyond Visual Range Target's Information Simulation Test Technology[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1701-1704.
- [3] 徐清华, 徐海刚, 李中良. 直升机超视距主动引导定位误差分析[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(10): 60-63.
Xu Qinghua, Xu Haigang, Li Zhongliang. Analysis on OTH Active-Guiding Positioning Error for Helicopters [J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(10): 60-63.
- [4] 张鑫博, 杨晓萍. 数据链远程目标指示位置误差计算方法研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(2): 13-15.
Zhang Xinbo, Yang Xiaoping. Calculation method for position error of data link remote target designation[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(2): 13-15.
- [5] 谭飞勇, 曹之新, 郑晓晖. 引导兵力确定目标位置方法及精度研究[J]. 舰艇电子工程, 2010, 191(5): 94-97.
Tan Feiyong, Cao Zhixin, Zheng Xiaohui. Research of Method and Precision on the Lead Troops Decision Object Position[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 191(5): 94-97.
- [6] 赵凯, 杨维, 石德乾, 等. 自行装备间目标指示与导引精度分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 1(1): 71-75.
Zhao Kai, Yang Wei, Shi Deqian, et al. Analysis on Target Indication and Guidance Accuracy Among Self-Propelled Equipments[J]. Journal of gun Launch&Control, 2010, 1(1): 71-75.
- [7] 朱汉雨, 荣海洋. 侦察兵力通过数据链传递目标指示的方法探讨[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 1(29): 61-66.
Zhu Hanyu, Rong Haiyang. Methods of Scouting Plane Transmitting Object Information to Submarine through Data Link[J]. Command Control&Simulation, 2007, 1(29): 61-66.
- [8] 张鑫博, 杨晓萍. 数据链远程目标指示位置误差计算方法研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(2): 13-15.
Zhang Xinbo, Yang Xiaoping. Calculation method for position error of data link remote target designation[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(2): 13-15.
- [9] 刘慧霞, 梁彦, 程咏梅, 等. 天波超视距雷达的坐标变换[J]. 计算机仿真, 2006, 23(3): 70-73.
Liu Huixia, Liang Yan, Cheng Yongmei, et al. A Coordinate Transformation Algorithm for Over-the-Horizon-Radar[J]. computer simulation, 2006, 23(3): 70-73.
- [10] 卢江涛, 段立, 罗兵. 大地坐标系的超视距目标指示系统[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(10): 81-84.
Lu Jiangtao, Duan Li, Luo Bing. Over the Horizon Target Designation System based on Geodetic Coordinate[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(10): 81-84.
- [11] 卢江涛, 杨露菁, 段立. 一种应用于超视距目标指示的误差分析方法[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(2): 88-91.
Lu Jiangtao, Yang Lujing, Duan Li. An Error Analysis for Over-Horizon Target Designation[J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(2): 88-91.
- [12] 吴云桥, 耿伯英, 段立. 基于大地坐标的对空超视距目标跟踪研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(8): 40-43.
Wu Yunqiao, Geng Boying, Duan Li. Beyond-Visual-Range Air Target Tracking based on Geodetic coordinates[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(8): 40-43.
- [13] 吴云桥, 段立, 耿伯英. 基于大地坐标的多舰协同超视距目标指示研究[J]. 舰艇电子工程. 2008, 172(10): 60-63.
Wu Yunqiao, Duan Li, Geng Boying. Research on Multi-warship Collaboration Over Horizon Target Indication Based on Geodetic Coordinates[J]. Ship Electronic Engineering. 2008, 172(10): 60-63.
- [14] 李环寰. 空间坐标系的换算与程序实现[J]. 信息与电脑, 2016, 1(1): 66-67.
Li Huanhuan. Conversion and program realization of spatial coordinate system[J]. China Computer & Communication, 2016, 1(1): 66-67.
- [15] 赵建军, 陈滨, 杨利斌. 基于四元数的大地坐标转换算法及实现[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(4): 202-205.
Zhao Jianjun, Chen Bin, Yang Libin. Algorithm and realization of conversion of earth coordinate based on quaternion[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(4): 202-205.
- [16] 邱云峰, 倪津, 杨映泉, 等. 基于CGCS2000下地方大地坐标基准的建立与应用[J]. 测绘工程, 2013, 22(4): 42-44.
Qiu Yunfeng, Ni Jin, Yang Yingquan, et al. On the establishment and application of local geodetic

- coordinate datum based on CGCS2000[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2013, 22(4): 42-44.
- [17] 孙晏涛. 水面舰艇运动仿真模型研究[J]. *舰船电子工程*, 2011, 204(6): 118-121.
Sun Yantao. Research on Surface Ships Motion Simulation[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 204(6): 118-121.
- [18] 蔺敏. 基于多平台的空中机动目标跟踪技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 1-10.
Lin Min. Research on Tracking Technology of Multi-aerial Maneuvering Targets Based on Multi-platforms[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1-10.
- [19] 贾健. 多平台防空协同任务分配问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 5-17.
Jia Jian. Cooperative Task Allocation in Multi-Platform Air Defense[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012: 5-17.
- [20] 于翔川. 基于非线性滤波的目标跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 5-10.
Yu Xiangchuan. Target Tracking Algorithms Based on Nonlinear Filtering[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2009: 5-10.
- [21] 庄玮. 多平台定位系统的数据融合技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 9-14.
Zhuang Wei. The Data Fuse Technology Study for the Multi-Platform Positioning System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 9-14.
- [22] 朱明强, 侯建军, 刘颖, 等. 基于自适应比例修正无迹卡尔曼滤波的目标定位估计算法[J]. *兵工学报*, 2013, 34(5): 561-566.
Zhu Mingqian, Hou JianJun, Liu Ying, et al. Target Locating Estimation Algorithm Based on Adaptive Scaled Unscented Kalman Filter[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(5): 561-566.
- [23] 曹鹏. 基于 IMM-UKF 运动目标跟踪系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012: 17-24.
Cao Peng. The Research on the Moving Target Tracking System Based on the IMM-UKF[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012: 17-24.
- [24] 侯磊. 机动目标跟踪算法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015: 14-20.
Hou Lei. The Research on Maneuvering Target Tracking Algorithm[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015: 14-20.
- [25] 汲清波, 冯驰, 吕晓凤. UKF、PF 与 UPF 跟踪性能的比较[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(32): 60-63.
Ji Qingbo, Feng Chi, Lv Xiaofeng. Comparing of target-tracking performances of UKF, PF and UPF[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(32): 60-63.
- [26] 苏畅. UKF 在水中目标跟踪系统中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 8-18.
Su Chang. The Application of UKF Algorithm in an Underwater Target Tracking System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 8-18.

(上接第 3501 页)

- [16] Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver, et al. Human-level control through deep reinforcement learning[J]. *Nature (S0028-0836)*, 2014, 518(2): 529-533.
- [17] Martin Riedmiller, Heinrich Braun. A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1993. San Francisco, USA: IEEE, 1993: 586-591.
- [18] 贾立山, 谈至明, 王知. 基于随机参数调整的改进反向传播学习算法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 751-757.
JIA Lishan, TAN Zhiming, WANG Zhi. Modified BP Algorithm Based On Random Adjustment of Parameters [J]. *JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE)*, 2011, 39(5): 751-757.